干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

石羊河上游地面人工增雨效果统计检验分析

程 鹏[1]， 沈天成[2]， 罗 汉[1]， 陈 祺[1]， 庞朝云[1]， 黄 山[1]
（1. 甘肃省人工影响天气办公室，甘肃 兰州 730020；2. 武威市水务局，甘肃 武威 733000）

摘 要：为深入了解石羊河上游的人工增雨效果，评估不同月份的人工增雨效果，利用统计方法对2010—2019年4—10月石羊河上游地区的人工增雨作业效果进行了检验和分析。结果表明：石羊河上游4—10月平均绝对增雨量为4.7 mm，检验结果通过0.05的显著性检验。春季（4—5月）和秋季（9—10月）人工增雨效果明显好于夏季（6—8月）；4月增雨效果最好，相对增雨率在35%以上。区域历史回归分析的结果介于序列分析和区域对比分析之间，相对客观。初步结果显示，人工增雨使石羊河上游年降水增加13.5%，人工增雨效果显著。

关 键 词：人工增雨；统计检验；序列分析；区域历史回归统计分析；石羊河
文章编号：

我国人工影响天气经过多年发展，在人工防雹、缓解水资源短缺等方面发挥着越来越为重要的作用，随着人工增雨作业规模的不断扩大，如何科学客观地评价人工增雨的效果是人工影响天气研究的一项重要工作，也是推动人工影响天气技术发展的有效途径[1-3]。由于自然降水变率很大，所以自从人工影响天气工作开展以来，对人工催化作业效果的评估一直是一个科学难题，引起了研究学者的广泛关注。通过随机化的外场催化试验开展人工增雨效果检验是国内外普遍认可的方式，美国中部的白顶计划、怀俄明地形云催化试验[4-7]，以及我国北方层状云降水试验[8-9]、福建古田试验[10-11]等试验结合先进的探测设备，对人工增雨的效果检验评估起到了重要的引领和示范作用。

地面人工增雨受多种因素影响，较难开展随机化人工增雨试验，因而效果评估多采用非随机化试验方案[11-13]，进而利用统计学方法对试验进行效果评估[14]。常用的效果评估检验方法有统计检验、物理检验和基于数值模式的数值模拟检验[14-15]，另外，示踪法在近年来美国地形云催化试验中也得到了深入的实践[16]。统计检验能在一定显著性水平上得出定量的增雨结果，是目前较为常用的检验方法，围绕统计检验开展了许多技术与方法的探索[17-21]并取得了明显进展。Defelice等[4]对美国的播云试验效果评估后得出增雨率达5%~15%的结论；国内学者利用数值分析方法对非随机化试验的功效进行分析，发现区域历史回归统计分析的功效最高[14-15]；在江淮对流云人工增雨效果检验中，将区域历史回归统计分析和物理检验方法相结合，给出了对应统计检验结果的物理证据，发现对流云增雨效果更好[22-23]；钱莉等[24-25]利用统计检验方法对人工增雨进行了检验，取得了较好的效果[25]。

随着区域人口增多和经济建设的发展，石羊河流域生态环境极为脆弱[26]。开发利用空中云水资源是缓解我国特别是西北地区淡水资源缺乏的有效手段之一[27-28]。自2010年以来，气象部门加大了在石羊河流域人工增雨作业规模，石羊河流域年降水量明显增加，生态环境呈现出持续向良好态势发展的情况[29]。客观评估石羊河流域人工增雨效果，对完善作业方案、提高作业效果极为重要。基于以上考虑，本文以2010—2019年石羊河流域人工增雨为例，利用序列分析、区域对比分析、区域历史回归

收稿日期：2020-04-26； **修订日期**：2020-12-01
基金项目：国家重点研发计划（2019YFC1510302）；西北区域人影科学试验研究项目-研究试验总设及成果集成（RYSY201909）；甘肃省科技计划（20JR5RA111）；甘肃省气象局科研项目（Zd2021-03）资助
作者简介：程鹏（1981-），男，高级工程师，主要从事人工影响天气研究. E-mail: 46843758@qq.com

分析等统计检验方法，分析在一定气候背景变化条件下人工增雨效果的显著性，以期对干旱区开展人工增雨作业和效果检验提供参考依据。

1　研究区概况

石羊河是甘肃省河西走廊内流水系的第三大河，发源于祁连山脉东段冷龙岭北侧的大雪山，河全长250 km，位于101°41′~104°16′E，36°29′~39°27′N之间，全水系自东向西，主要有8条支流，分布在武威市和金昌市境内。石羊河南部为祁连山水源涵养区，北部毗邻腾格里和巴丹吉林两大沙漠，流域内降水分布不均，平均降水量260 mm，而北部民勤县平均降水量只有113 mm，蒸发量达2600 mm以上[30]，是典型的资源型缺水地区。本文选取的作业区及对比区位于石羊河上游，横跨南部祁连山高寒山区半湿润-半干旱湿润带和中部走廊平原区半干旱-干旱带。近年来，气象部门不断增加石羊河人工增雨地面作业布局，持续增加作业点，到2019年已达71个，作业受益面积达6000 km^2。2010—2019年石羊河流域年平均开展人工增雨作业485点(次)，年平均发射人雨弹2100枚，火箭弹1500枚，每枚火箭弹所含碘化银是人雨弹含量的37.5倍，按人雨弹折算年平均发射人雨弹50000多枚，作业点及作业量变化见图1。

2　资料与方法

2.1　资料

根据研究区域内气象观测站点和地面人工增雨作业站点分布情况，综合考虑资料序列的完整性和可靠性，降水资料选取流域内武威、古浪、永昌等3个气象站的1960—2019年的逐月降水资料，资料来源于中国气象数据网。人工增雨作业站点信息及作业情况由甘肃省人工影响天气办公室提供。作业试验期为2010—2019年4—10月，对比的历史期为1960—2009年4—10月。

2.2　效果检验方法

2.2.1　*序列分析*　序列分析检验方法只设作业区，无对比区。将作业区历史平均雨量作为试验期作业区自然降水量的估计值Y_1，然后与作业区作业时间段内实测雨量Y_2进行比较，得出人工影响的效果估计量。通过对效果估计量进行显著性检验定性

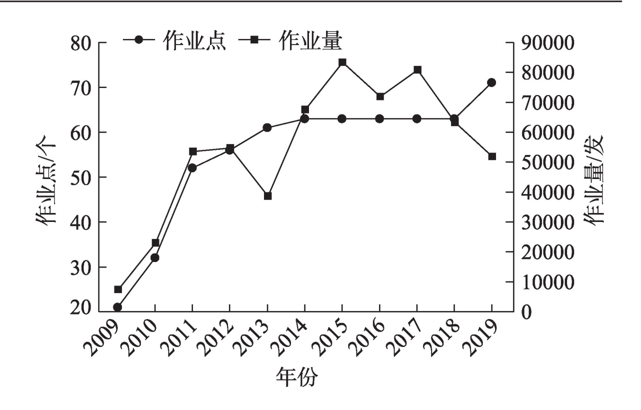


图1　石羊河流域人影作业点及作业量变化

Fig. 1　Change of cloud seeding operations in the Shiyang River Basin

说明自然气候变化背景下人工增雨效果[14]。由于日雨量的变差较大，在效果检验中降水量常采用月、季雨量作为评估单元。

相对增雨率(E,%)和绝对增雨量(ΔR,mm)的计算公式如下：

$$E=\left(\frac{Y_2}{Y_1}-1\right)\times 100\% \tag{1}$$

$$\Delta R=Y_2-Y_1 \tag{2}$$

式中：Y_1为作业期期望值(mm)；Y_2为作业期自然降水量实测值(mm)。

2.2.2　*区域对比分析*　选取合理的作业影响区和对比区，通过对效果检验时段内对比区和作业影响区的降水量进行比较得出增雨效果[24]。假设试验期对比区和作业区的降水量在空间分布上是均匀的，计算作业影响区和对比区月降水相关系数(公式3)，相关系数的大小可作为两区域平均降水量相关性的判定依据。以相同时间段内对比区自然降雨量作为作业影响区的估计值Y_1(mm)，与作业影响区的实测降雨量Y_2(mm)进行比较，得出人工增雨效果。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{3}$$

式中：r为影响区和对比区间的月降水相关系数；$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为对比区和作业影响区历史月平均降水量(mm)；x_i、y_i分别为历史期的月降水量(mm)；n为样本数；i=1, 2, ⋯, n。

2.2.3　*区域历史回归统计分析*　通过计算作业影响区和对比区的历史期(未作业时)降水量相关关系，

估算效果检验时间范围内作业影响区的降水量，与作业影响区实测值比较得到增雨效果[20,25]。该方法常适用于对较长时间的累积作业样本进行效果检验，需要确定合理的效果检验目标区和对比区，通过对历史降水资料进行正态变换和正态检验后，以对比区雨量为自变量，影响区雨量为因变量，利用最小二乘法建立对比区和作业区的降水一元线性回归方程，从而计算得到目标作业期估测降雨量，与目标区实测降水量进行比较可得出增雨量和增雨率[20]。

3 结果与分析

3.1 试验目标区和对比区选取

根据中国气象局人工影响天气中心发布的《人工增雨作业效果检验技术指南》中的基本条件，选择确定作业影响区和对比区(图2)[31]。对比区内国家气象站点包含永昌站和金昌站，作业影响区内所含国家气象站点为武威站和古浪站，因金昌建站较晚，历史资料序列不能和其他站同步，故选永昌站为对比区代表站，武威站和古浪站为作业目标区代表站，3站资料序列同步。武威站与永昌站及武威站与古浪间站相距约55 km，所处地理位置气候特征及天气影响系统相近；以永昌站为代表站的对比区处在武威站和古浪站为代表站的作业影响区的上风方，在作业影响区进行催化作业时，对比区不受其影响，作业影响区与对比区的选取合理。作业影响区和对比区的历史同期月平均降水量相关系数为0.67。

3.2 序列分析

所用的历史资料序列为1960—2009年的逐月降水资料，由于所选样本序列较长，可认为试验区的自然降水量是平稳的时间序列。根据作业试验

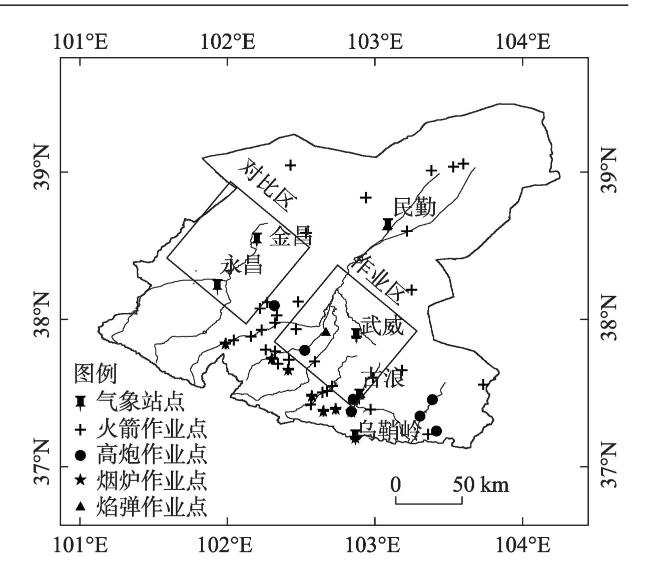


图2 效果检验作业区及对比区[31]

Fig. 2 Cloud seeding area vs comparison non-seeding area[31]

区历史降水量计算出了试验区历史平均降水量，将其作为试验区自然降水期望值(Y_1)，与作业区试验期实测降水量(Y_2)进行比较，得出人工影响的效果估计量(表1)。序列分析检验结果显示，石羊河上游平均月绝对增雨量为3.2 mm，平均相对增雨率为12.1%；月相对增雨率在2.5%~35.2%之间，4月增雨效果最好，达到了35.2%，7月和9月增雨效果较差，分别为4.9%、2.5%。利用秩和检验法对增雨效果进行显著性检验，只有通过显著性检验的结果才是可信的[32]。将开展人工增雨作业历史期和作业期4—10月逐月降水量按月从小到大秩序列表计算，取样本容量小的秩和做比较，即开展人工增雨作业期10 a的逐月降水量的秩和(T)做比较。当n_1、$n_2 \geq 10$时，可认为秩和(T)近似于正态分布$N\left[\frac{n_1(n_1+n_2+1)}{2},\right.$ $\left.\sqrt{\frac{n_1 n_2(n_1+n_2+1)}{12}}\right]$，此时可用秩和检验法来检验，计算公式如下：

表1 序列分析检验结果

Tab. 1 Results of sequence analysis test

检验结果	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均值
期望值(Y_1)/mm	16.2	28.1	34.6	45.2	53.7	37.1	17.9	33.3
实测值(Y_2)/mm	21.9	31.8	38.5	47.4	57.6	38.0	19.8	36.4
绝对增雨量(ΔR)/mm	5.7	3.7	4.0	2.2	3.9	0.9	1.8	3.2
相对增雨率(E)/%	35.2	13.3	11.4	4.9	7.2	2.5	10.2	12.1
显著性分析(u)	−1.7*	0.3	1.6*	3.4*	5.4*	1.5	−2.1*	−

注：*表示通过显著性水平为0.05的检验。

$$u=\frac{T-\text{均值}}{\text{标准差}}=\frac{T-\frac{n_1(n_1+n_2+1)}{2}}{\sqrt{\frac{n_1n_2(n_1+n_2+1)}{12}}}\tag{4}$$

式中：u为显著性分析；T为秩和值；n为计算秩和的样本容量；n_1、n_2分别为10和50。

利用秩和检验法对各月的增雨效果进行显著性检验。由秩和检验结果(表1)可以看出，除5月和9月外，其他各月单边检验$|u|>1.64$，显著性水平为0.05时，u值为(−1.64，+1.64)，表明4月、6—8月及10月增雨效果显著，显著性水平在0.05以上；5月和9月人工增雨效果不显著。序列分析方法是将作业影响区历史时期降雨量的平均值作为作业影响区的自然降雨量，虽然检验方法简便，但是由于作业影响区历史平均降水量偏多或偏少对其结果影响较大，采用该方法计算结果存在一定偏差。

3.3　区域对比分析

根据前面所选的作业影响区和对比区，计算了历史期作业影响区和对比区各月的相关系数(表2)，除4月和10月外，其余各月相关系数均达到了0.60以上，相关性较好；4月和10月则分别为0.36、0.49，相关性一般。分别计算出了绝对增雨量和相对增雨率(表2)，区域对比分析检验结果显示，石羊河上游平均月绝对增雨量为5.5 mm，平均相对增雨率为30.2%；月相对增雨率在1.6%~79.5%之间，4月增雨效果最好，达到了79.5%，6月和7月增雨效果较差，分别为1.6%、2.0%。进行显著性检验，各月单边检验$|u|>1.64$，均通过了0.05以上的显著性检验，表明各月增雨效果显著。相关系数较差的4月、10月，相对增雨率达虽达到79.5%、55.8%，但由于相关性较差，其可信度较低；而6—8月相对增雨率在1.6%~3.6%之间，增雨效果一般，5月和9月增雨效果最好，相对增雨率分别为36.8%、32.4%。由于作业区和对比区的历史降水量本身就存在一定差异，将对比区的降水量作为作业区的自然降水量估计值，导致计算结果误差变大，特别是相关性较差的月份，其误差将更大。

3.4　区域历史回归统计分析

按照区域历史回归统计检验方法，对历史期作业影响区和对比区的数据集进行正态变换后，作业目标区和对比区的雨量各月相关系数在0.73~0.90之间，作业影响区与对比区的降水量相关性较好[31]。以对比区雨量(x_i)为自变量，影响区雨量(y_i)为因变量，利用最小二乘法建立4—10月对比区和作业区的逐月一元线性回归方程$y=a+bx$。

$$a=\bar{y}-b\bar{x}\tag{5}$$

$$b=\frac{S_{xy}}{S_x^2}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^{n}x_i^2-n\bar{x}^2}\tag{6}$$

式中：$\bar{x}$和$\bar{y}$分别表示对比区、作业区历史降水量平均值(mm)；S_{xy}为协方差；S_x^2为方差；n为样本数；$i=1, 2, \cdots, n$。建立的4—10月逐月一元线性回归方程见图3。回归方程利用F-检验方法进行了显著性检验，结果显示各月回归方程均通过了显著性水平为0.01的检验，建立的回归方程回归效果显著。将对比区的逐月降水量带入逐月一元线性回归计算得到作业影响区的各月绝对增雨量和相对增雨率(表3)。

区域历史回归统计分析结果表明，石羊河上游4月人工增雨效果最好，增雨率和增雨量分别为37.4%、5.9 mm，其次是10月，增雨率和增雨量分别为22.8%、3.7 mm；而7月的相对增雨率仅为10.0%，人工增雨的效果是几个月中最低的。4—10月的平均增雨率为17.5%，月平均增雨量为4.7 mm。运用t-检验法对检验结果进行显著性检验，结果表明，5、

表2　区域对比分析检验结果

Tab. 2　Statistical test results from historical regression analysis of regional data

检验结果	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均值
相关系数(r)	0.36	0.89	0.75	0.73	0.84	0.60	0.49	0.67
期望值(Y_1)/mm	12.2	23.2	37.9	46.5	55.5	28.7	12.7	30.9
实测值(Y_2)/mm	21.9	31.8	38.5	47.4	57.5	38.0	19.8	36.4
绝对增雨量(ΔR)/mm	9.7	8.6	0.6	0.9	2.0	9.3	7.1	5.5
相对增雨率(E)/%	79.5	36.8	1.6	2.0	3.6	32.4	55.8	30.2
显著性分析(u)	−3.6*	4.6*	8.1*	9.6*	11.0*	5.7*	2.5*	−

注：*表示通过显著性水平为0.05的检验。

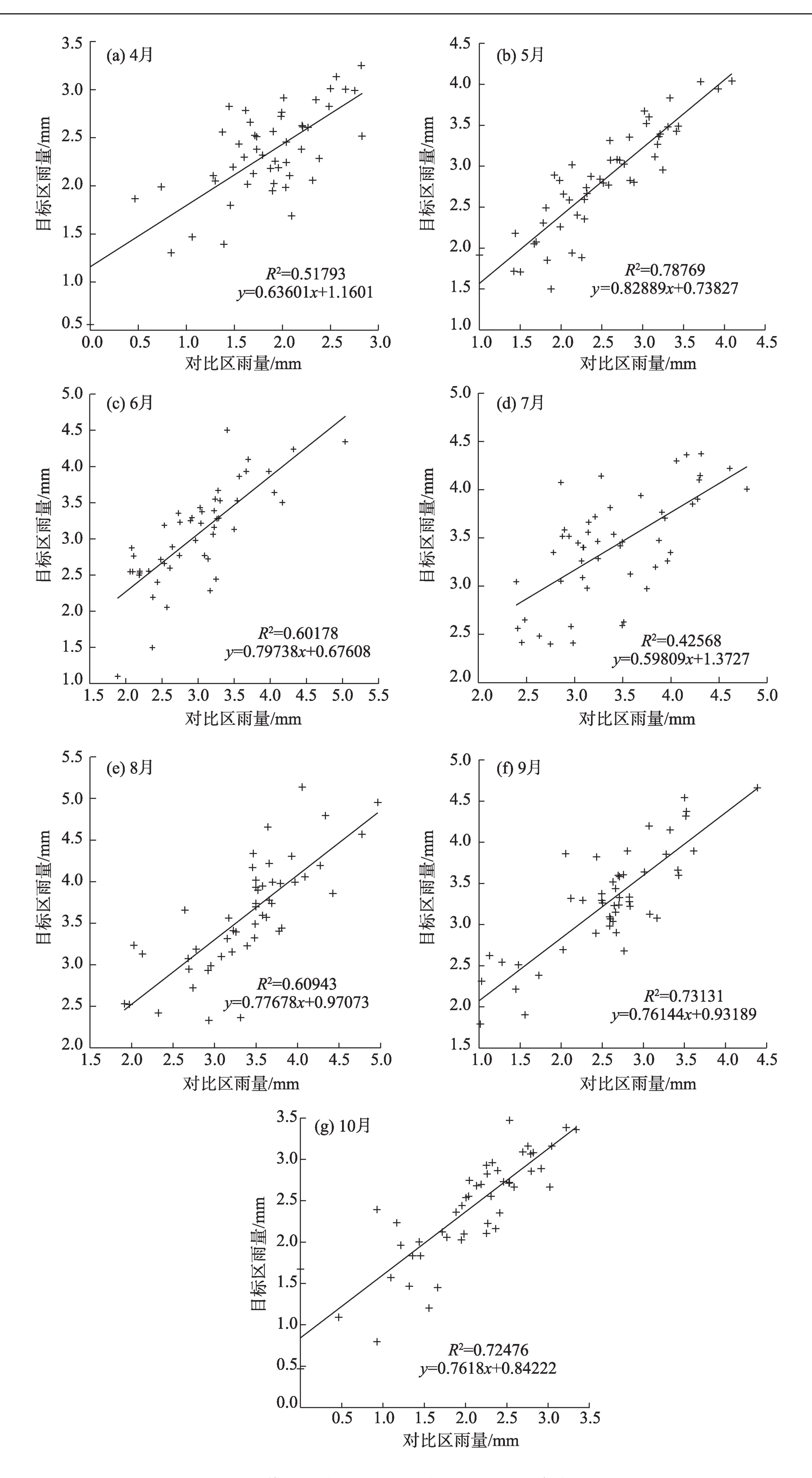


图3 作业区与对比区区域历史回归拟合方程

Fig. 3 Regression equations of historical rainfall between the seeding area and contrasting area

表3　区域历史回归分析检验结果

Tab. 3　Test results of regional historical regression analysis

检验结果	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均值
绝对增雨量(ΔR)/mm	5.9	3.7	4.0	4.3	6.7	4.7	3.7	4.7
相对增雨率(E)/%	37.4	13.3	11.7	10.0	13.1	14.2	22.8	17.5
t-检验结果	7.78**	1.93*	1.68*	1.70*	1.68*	2.32**	4.91**	-

注:**表示通过显著性水平为0.05的检验;*表示通过显著性水平为0.1的检验。

6、7、8月均通过了显著性水平为0.1的检验,其他月通过了显著性水平为0.05的检验,作业区增雨效果显著。

3.5　检验效果的统计方案比较

从石羊河上游人工增雨效果的3种统计检验结果对比来看,序列分析、区域对比分析和区域回归统计分析的平均相对增雨率分别为12.1%、30.2%和17.5%,绝对月平均增雨量分别为3.2 mm、5.5 mm和4.7 mm,3种统计检验方法的结果都表明在石羊河上游进行的人工增雨作业效果显著。其中序列分析结果偏小,区域对比分析结果相对偏大,而区域历史回归统计分析结果居于两者之间。

大量的人工增雨统计试验检验表明:序列分析和区域对比分析2种检验方法的结果失真率较大,功效较低,存在假效果的可能性较大;区域历史回归统计分析由于灵敏度高,使用了较大的样本容量,失真率较小,若对比区选择合理,其产生的假效果小,检验功效、准确度较高[14,24,32]。本文所选取作业影响区和对比区处在同一天气系统影响区,两区间距离相近,对比区处在影响区上游,不受影响区催化作业影响,对比区选择合理。故区域历史回归统计分析能比较客观、准确地反映石羊河上游人工增雨的结果。

3.6　效果分析

对增雨效果进行的显著性检验结果表明:区域历史回归分析中,各月均通过了显著性水平为0.05或0.1的检验;序列分析中,5月和9月未通过显著性检验,4月、6—8月、10月均通过了显著性水平为0.05的检验;区域对比分析中,各月均通过了显著性水平为0.05的检验。3种统计检验方法得出的增雨率有所差异,其中,序列分析得出各月相对增雨率在2.5%~35.2%之间,4月增雨效果最好,达到了35.2%,7月和9月增雨效果较差,分别为4.9%、2.5%;区域对比分析检验结果显示各月相对增雨率在1.6%~79.5%之间,4月增雨效果最好,达到了79.5%,6月和7月增雨效果较差,分别为1.6%、2.0%。区域历史回归统计分析结果显示,各月相对增雨率在10%~37.4%之间,4月和10月人工增雨效果最好,增雨率分别为37.4%、22.8%;7月相对增雨率最低,仅为10.0%。春季(4—5月)和秋季(9—10月)人工增雨效果普遍较好,远高于夏季(6—8月)的相对增雨率。这一时期降水较为稳定,多为层状云降水,冰晶粒子含量充沛[33],催化剂催化充分;而夏季(6—8月)对流性降水较多,相对增雨率较低,说明石羊河流域稳定性降水的人工增雨效果要远好于对流性降水的增雨效果。春季和秋季是石羊河降水少、水资源最为短缺的时期,因此,应抓住有利时机,增加春季和秋季的人工影响天气作业量,有利于增加流域水资源总量和缓解用水矛盾。

综合比较3种统计检验结果,初步得出2010—2019年4—10月石羊河上游人工增雨平均相对增雨率为17.5%,人工增雨使年降水增加13.5%,10 a累计人工增雨量为337 mm。目前,国内外进行的人工增雨试验作业效果为8%~17%之间[8,34],石羊河流域的人工增雨效果达到了17.5%,说明石羊河流域进行人工增雨的效果是明显的,人工增雨可作为石羊河流域开发空中云水资源、缓解当地水资源短缺的有力措施。

4　结 论

为开发利用空中水资源,改善石羊河流域生态环境,气象部门从2010年开始持续增加石羊河上游作业量。本文利用3种统计检验方法,对石羊河流域的人工增雨效果进行了统计检验分析。通过对作业效果的评估,发现春、秋季的人工增雨效果较好。同时,对适宜于该区域的统计检验方法进行了探讨,得到以下结论:

(1) 序列分析、区域对比分析和区域历史回归分析3种检验方法得到的平均增雨率分别为

12.1%、30.2%和17.5%,月平均增雨量分别为3.2 mm、5.5 mm、4.7 mm。人工增雨使年降水增加13.5%,石羊河上游人工增雨作业效果显著。

(2) 通过对3种统计检验方法结果对比分析得出,区域历史回归分析的结果介于序列分析和区域对比分析之间,其结果相对客观,该方法适宜于河西走廊内陆河流域开展增雨效果检验评估。区域历史回归统计结果显示,各月相对增雨率在10%~37.4%之间。

(3) 3种检验方法结果均显示,春季(4—5月)和秋季(9—10月)人工催化效果明显好于夏季(6—8月),相对增雨率较高;4月人工增雨效果最好,相对增雨率在35%以上。

参考文献(References)

[1] 郭学良, 方春刚, 卢广献, 等. 2008—2018年我国人工影响天气技术及应用进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30(6): 641-650. [Guo Xueliang, Fang Chungang, Lu Guangxian, et al. Progresses of weather modification technologies and applications in China from 2008 to 2018[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(6): 641-650.]

[2] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 951-967. [Hong Yanchao, Lei Hengchi. Research advance and thinking of the cloud precipitation physics and weather modification[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6): 951-967.]

[3] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974. [Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 967-974.]

[4] Defelice T P, Golden J, Griffith D, et al. Extra area effects of cloud seeding: An updated assessment[J]. Atmospheric Research, 2014, 135-136(1): 193-203.

[5] Breed D, Rasmussen R, Weeks C, et al. Evaluating winter orographic cloud seeding: Design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(2): 282-299.

[6] Geerts B, Miao Q, Rasmussen M, et al. The impact of glaciogenic seeding on orographic cloud processes: Preliminary results from the Wyoming Weather Modification Pilot Project[J]. Journal of Weather Modification, 2010, 42(1): 105-112.

[7] 段婧, 楼小凤, 卢广献, 等. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象, 2017, 43(12): 1562-1571. [Duan Jing, Lou Xiaofeng, Lu Guangxian, et al. International recent progress in weather modification technologies[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(12): 1562-1571.]

[8] 姚展予. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 786-795. [Yao Zhanyu. Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 786-795.]

[9] 游来光, 马培民, 胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究[J]. 气象科技, 2002, 30(增刊): 19-63. [You Laiguang, Ma Peimin, Hu Zhijin. Experimental study on artificial precipitation of stratiform cloud in north China[J]. Meteorological Science and Technology, 2002, 30(Suppl.): 19-63.]

[10] 曾光平, 方仕珍, 肖锋. 1975—1986年古田水库人工降雨效果总分析[J]. 大气科学, 1991, 15(4): 97-108. [Zeng Guangping, Fang Shizhen, Xiao Feng. The total analysis of the effect of artifical rainfall in Gutian Reservoir area from 1975 to 1986[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1991, 15(4): 97-108.]

[11] 曾光平, 吴明林, 林长城, 等. 古田水库人工降雨效果的综合评价[J]. 应用气象学报, 1993, 4(2): 154-161. [Zeng Guangping, Wu Minglin, Lin Changcheng, et al. A comprehensive evaluation of the artificial effect of artificial precipitation in Gutian Reservoir area[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1993, 4(2): 154-161.]

[12] 徐冬英, 张中波, 唐林, 等. 几种人工增雨效果检验方法分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 105-107. [Xu Dongying, Zhang Zhongbo, Tang Lin, et al. Analysis on several testing methods of artificial precipitation effect[J]. Journal of Meterological Research and Application, 2015, 36(1): 105-107.]

[13] 王吉宏, 班显秀, 袁健, 等. 人工增雨效果检验方法概述[J]. 辽宁气象, 2003, 19(1): 31-32. [Wang Jihong, Ban Xianxiu, Yuan Jian, et al. An overview of the test methods for the effect of artificial precipitation enhancement[J]. Liaoning Meteorological Quarterly, 2003, 19(1): 31-32.]

[14] 王婉, 姚展予. 非随机化人工增雨作业功效数值分析和效果评估[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 855-861. [Wang Wan, Yao Zhanyu. Numerical analysis of statistical power in precipitation enhancement experiment in Beijing and estimation of operational cloud seeding effectiveness[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6): 855-861.]

[15] 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 739-745. [Fang Bin, Xiao Hui, Wang Zhenhui, et al. Application of cluster analysis to the statistical assessment of the effect of artifical rain enhancement[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(6): 739-745.]

[16] Pokharel B, Geerts B, Jing Xiaoqin, et al. The impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains: A multi-sensor case study[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 147-148: 162-182.

[17] 冯宏芳, 隋平, 蔡英群, 等. 蓄水型人工增雨效果检验[J]. 气象科技, 2010, 38(4): 510-514. [Feng Hongfang, Sui Ping, Cai Yingqun,

et al. Effectiveness evaluation of precipitation enhancement for water storage[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(4): 510-514.]

[18] 王以琳, 李德生, 刘诗军. 飞机人工增雨分层历史回归效果检验方法探讨[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 862-870. [Wang Yiling, Li Desheng, Liu Shijun. Stratified sampling historical regression method for aircraft precipitation enhancement effect test[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6): 862-870.]

[19] 章澄昌. 当前国外人工增雨防雹作业的效果评估[J]. 气象, 1998, 24(10): 3-8. [Zhang Chengchang. Evaluation of the effect of artificial precipitation and hail suppression in foreign countries[J]. Meteorological Monthly, 1998, 24(10): 3-8.]

[20] 王黎俊, 银燕, 郭三刚, 等. 基于气候变化背景下的人工防雹效果统计检验: 以青海省东部农业区为例[J]. 大气科学学报, 2012, 35(5): 524-532. [Wang Lijun, Yin Yan, Guo San'gang, et al. A statistics evaluation of hail suppression effect under the background of climate change: A case study of east agricultural region in Qinghai Province[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(5): 524-532.]

[21] 常倬林, 崔洋, 张武, 等. 基于CERES的宁夏空中云水资源特征及其增雨潜力研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1112-1120. [Chang Zhuolin, Cui Yang, Zhang Wu, et al. Characteristics and developing potential of cloud water resource in Ningxia with the CERES data[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1112-1120.]

[22] 蒋年冲, 吴林林, 曾光平. 抗旱型火箭人工增雨效果检验方法初步研究[J]. 气象, 2006, 32(8): 54-58. [Jiang Nianchong, Wu Linlin, Zeng Guangping. On effect test of drought-resistant rocketry artificial precipitation enhancement operation[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(8): 54-58.]

[23] 贾烁, 姚展予. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象, 2016, 42(2): 238-245. [Jia Shuo, Yao Zhanyu. Case study on the convective clouds seeding effects in Yangtze-Huaihe region[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(2): 238-245.]

[24] 钱莉, 王文, 张峰, 等. 河西走廊东部冬春季人工增雪试验效果评估[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 349-354. [Qian Li, Wang Wen, Zhang Feng, et al. Assessment on the artificial snowfall experiment in the east Hexi Corridor in winter and spring[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(2): 349-354.]

[25] 钱莉, 俞亚勋, 杨永龙. 河西走廊东部人工增雨试验效果评估[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 679-685. [Qian Li, Yu Yaxun, Yang Yonglong. A assessment on artifical rainfall experiment in the east Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 679-685.]

[26] 黄玉霞, 王宝鉴, 张强, 等. 气候变化和人类活动对石羊河流域水资影响评价[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 866-872. [Huang Yuxia, Wang Baojian, Zhang Qiang, et al. The impact and assessment of climate change and human activities on the water resources of Shiyang River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(4): 866-872.]

[27] 邓振镛, 张强, 王润元, 等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1267-1275. [Deng Zhenyun, Zhang Qiang, Wang Runyuan, et al. A study on impacts of climate change on runoff of inland rivers and adaptive water resource managements in Hexi Corridor[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1267-1275.]

[28] 张强, 孙昭萱, 陈丽华, 等. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 381-390. [Zhang Qiang, Sun Zhaoxuan, Chen Lihua, et al. Reviews on studies of exploitation and utilization of cloud-water resource in the Qilian Mountains region[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 381-390.]

[29] 蒋菊芳, 魏育国, 韩涛, 等. 近30年石羊河流域生态环境变化及驱动力分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(21): 121-126. [Jiang Jufang, Wei Yuguo, Han Tao, et al. Ecological environment change and driving force in Shiyang River Basin in recent 30 years[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(21): 121-126.]

[30] 李丽丽, 王大为, 韩涛. 2000—2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 1108-1118. [Li Lili, Wang Dawei, Han Tao. Spatial-temporal dynamics of vegetation coverage and responding to climate change in Shiyang River Basin during 2000—2015[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 1108-1118.]

[31] 程鹏, 陈祺, 蒋友严, 等. 河西走廊石羊河流域近10年人工增雨效果检验评估[J]. 高原气象, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00074. [Cheng Peng, Chen Qi, Jiang Youyan, et al. Effect evaluation of artificial rainfall enhancement in the Shiyang River Basin of Hexi Corridor in the latest 10 years[J]. Plateau Meteorology, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00074.]

[32] 李斌, 郑博华, 兰文杰, 等. 克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果统计分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 686-692. [Li Bin, Zheng Bohua, Lan Wenjie, et al. Statistical analysis of effect of aircraft artificial snowfall enhancement in winter at Karamay[J]. Arid Land geography, 2018, 41(4): 686-692.]

[33] 王研峰, 王蓉, 王聚杰, 等. 西北干旱半干旱区一次层状云系微物理特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1291-1300. [Wang Yanfeng, Wang Rong, Wang Jujie, et al. Cloud microphysical characteristics on a stratiform nephsystem in the arid and semi-arid regions of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1291-1300.]

[34] 尹宪志, 徐启运, 张丰伟, 等. 近10年甘肃春季飞机人工增雨经济效益评估[J]. 江西农业学报, 2015, 27(11): 64-72. [Yin Xianzhi, Xu Qiyun, Zhang Fengwei, et al. Evaluation of economic benefit of aircraft artificial precipitation enhancement in spring in Gansu Province during recent 10 years[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(11): 64-72.]

Statistical test and analysis of artificial rainfall enhancement effect in the upper Shiyang River Basin

CHENG Peng[1], SHEN Tiancheng[2], LUO Han[1], CHEN Qi[1],
PANG Chaoyun[1], HUANG Shan[1]

(1. Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, Gansu, China;
2. Water Conservancy Bureau of Wuwei, Wuwei 733000, Gansu, China)

Abstract: The Shiyang River is an important inland river in the Hexi Corridor, northwest China' but within it, water resources are scarce, and the ecological environment is fragile. Since 2010, the scale of the artificial precipitation enhancement operations performed by the meteorological department in the basin has been greatly expanded, whereas the observed meteorological and ecological data have shown an increase in the local annual precipitation levels and a sustained improvement of the ecological environment. In this paper, to further evaluate the effects of artificial precipitation in the upper reaches of the Shiyang River, the monthly precipitation data from 1960 to 2019 were collected, and by using various statistical analysis methods (including sequence analysis, regional comparison analysis, and regional historical regression analysis), the effect of the artificial rainfall enhancement in the upper Shiyang River between April and October (2010—2019) was analyzed and evaluated, and the results were tested for statistical significance. The results show an average increase of 17.5% in the relative rainfall rate and an average monthly absolute rainfall increase of 4.7 mm, and the effect of artificial rainfall enhancement from April to October was significant. All these tests show that the effect of artificial rainfall enhancement in spring (April to May) and autumn (September to October) is significantly better than that in summer (June to August). The comparative analysis of the results of the three test methods shows that the results of the sequence analysis were relatively small, the results of the regional comparative analysis were relatively large, and the results of the regional historical regression analysis were more objective and accurate. The preliminary results show that the artificial rain enhancement is an effective measure in the improvement of water resources in the Shiyang River Basin. Such artificial precipitation enhancement operations have increased the annual mean precipitation by 13.5% and brought about an increase in the cumulative rainfall of 337 mm over 10 years. The results from this study suggest that the meteorological department should seize the most favorable opportunities in the spring and the autumn to carry out its artificial rain enhancement operations if it is to successfully increase the gross amount of water resources in the basin.

Key words: artificial rainfall enhancement; statistical test; sequence analysis; regional historical regression statistics; Shiyang River